

ANALISIS KEKUATAN KOLOM BETON BERTULANG DENGAN PENAMPANG PERSEGI DAN SILINDER AKIBAT BEBAN LEDAKAN (BLASTING LOADS)

Brian Priadana Mulrony¹⁾, Reni Suryanita²⁾, Ismeddyanto³⁾

¹ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293
Email: priadanabrian@gmail.com

² Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293
Email: reni.suryanita@eng.unri.ac.id

³ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293
Email: idediyant@gmail.com

Abstract

Bomb attack by terrorist in recent years had caused significant damage to structures, especially building structures. A bomb explosion within or nearby a building could cause huge damage toward structure even life loss. Due to the threat of bomb attack and it's impact, it had become necessity to analyze the effect of blasting load on structures. One of solution that could be applied in order to decrease the impact was by strengthening the column element of a building. This research compared the column strength between cylinder column and square column. Each column had equal quality of concrete material and steel reinforcement. The purpose of this research was to conclude which type of column had better strength when subjected to blasting load. There were four portals variation used in this analysis, which each portal subjected to different parameter of blasting load. Parameter of blasting load used were 100 kg and 500 kg weight of TNT with 10 m and 15 m stand-off distance. The type of blasting load in this analysis was surface burst and its parameter calculated with ATBlast software. Beside variation of weight and stand-off distance, location of bomb planted also varied too, which were in front of and beside of building. Analysis result showed that among all of portal variation, the cylinder column had better strength than square column. It was proven by capacity design check and percentage of failed column. Based on analysis result, cylinder column type had smallest percentage of failed column with 6.06%, whereas the square column type had largest percentage of failed column with 59.60%.

Keywords: *Blasting loads, Reflection wave, Surface Burst, Interaction Diagram*

A. Pendahuluan

Beban ledakan telah mendapatkan perhatian yang lebih beberapa tahun ini karena efek yang ditimbulkan terhadap kerusakan struktur. Serangan teroris terhadap gedung *World Trade Center* di New York pada 11 September 2001 telah memperlihatkan bagaimana beban ledakan memberikan kerusakan struktur dan kerugian material yang besar. Beban ledakan berpotensi menghancurkan gedung secara cepat dan menimbulkan banyak korban jiwa. Melihat besarnya efek

kerusakan yang diakibatkan oleh beban ledakan, maka hal ini menjadi perhatian dalam rekayasa ilmu teknik sipil. Penelitian untuk menganalisis perilaku struktur akibat beban ledakan dan mendesain bangunan yang tahan terhadap ledakan telah banyak dilakukan guna meminimalisir dampak kerugian yang dapat ditimbulkan.

Tugas akhir ini akan menganalisis kekuatan struktur bangunan bertingkat akibat beban ledakan dengan meninjau gaya-gaya dalam dan keruntuhan pada kolom struktur. Permodelan struktur menggunakan

model salah satu bangunan Rusunawa di Pekanbaru dengan variasi bentuk kolom yang akan dianalisis yaitu kolom persegi dan kolom silinder. Sementara dimensi dan mutu beton yang digunakan pada tiap variasi kolom tidak berbeda. Gelombang ledakan akan dimodelkan menjadi beban statik menggunakan bantuan *software ATBlast*. Beban ini akan diaplikasikan pada joint kolom yang terkena ledakan. Analisis gaya-gaya dalam akan dilakukan dengan *software* elemen. Parameter yang diamati adalah momen, aksial, dan persentase tulangan perlu pada kolom yang ditinjau kemudian dibandingkan kekuatannya berdasarkan perbedaan bentuk penampang kolom struktur.

Penelitian ini akan menganalisis kekuatan struktur dan besar keruntuhan kolom pada struktur. Model akan divariasikan berdasarkan perbedaan penampang kolom yaitu silinder dan persegi dengan mutu beton dan baja tulangan serta luas penampang kolom sama. Struktur dengan kolom silinder menggunakan diameter 0,45 m sedangkan kolom persegi memiliki dimensi penampang 0,4 m. Hasil analisis yang ditinjau berupa gaya-gaya dalam pada kolom yaitu aksial dan momen yang kemudian akan dibandingkan hasilnya dari kedua variasi model. Analisis struktur akan dianalisis menggunakan aplikasi *Finite Element* (Elemen Hingga). Hasil analisis akan dibandingkan dengan diagram interaksi kolom dalam pengecekan kapasitas kekuatan kolom. *Output* penelitian berupa perbandingan kekuatan kolom dari segi perbedaan penampang, sehingga dapat ditentukan penampang yang lebih baik dalam menahan beban ledakan.

Studi yang dilakukan bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur bangunan beton bertulang terhadap beban ledakan. Hasil respons yang diperoleh dapat digunakan sebagai pedoman awal dalam perencanaan awal suatu struktur. Selain itu, dengan mengetahui gaya-gaya dalam dan kekuatan kolom terhadap beban ledakan diharapkan dapat meminimalisir kerusakan

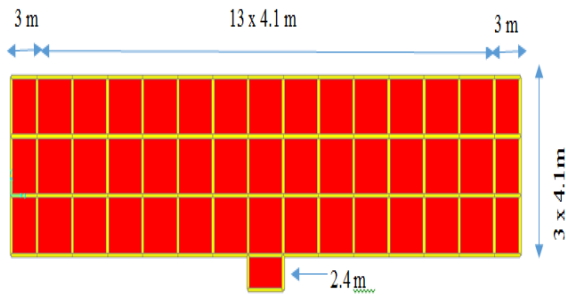
struktur dan kerugian jiwa dan material dengan merencanakan struktur bangunan yang tahan beban ledakan.

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan pemahaman mengenai karakteristik beban ledakan dan cara menganalisis kekuatan struktur dilihat dari pengecekan kapasitas kekuatan elemen struktur. *Output* penelitian berupa hasil perbandingan kekuatan dari penampang kolom persegi dan silinder dan penentuan penampang yang lebih efektif menahan beban ledakan pada struktur.

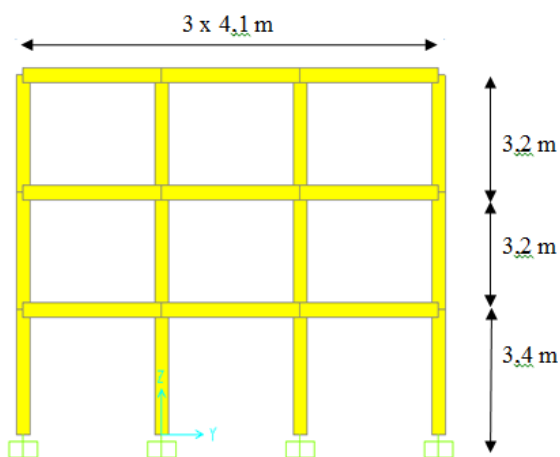
Analisis dilakukan dengan asumsi sebagai berikut:

1. Permodelan struktur mengambil contoh bangunan beton bertulang yang berfungsi sebagai rusunawa di Pekanbaru
2. Standar yang digunakan untuk perencanaan struktur beton bertulang dan analisis respons struktur akibat beban ledakan adalah SNI 1726-2013, PBI 1981, FEMA 426-2003, UBC 1994 dan TM 5-1300
3. Beban ledakan yang digunakan terdiri dari tiga variasi beban yaitu massa TNT 100 kg dan 500 kg dengan jarak 10 m, 15 m.
4. Bom diledakkan dengan dua kondisi, yaitu di samping struktur dan di depan struktur.
5. Bom yang dianalisis adalah tipe *Eksternal* (di luar gedung).
6. Perhitungan parameter beban ledakan menggunakan *software ATBlast*.
7. Analisis gaya-gaya dalam struktur terhadap beban ledakan dilakukan dengan bantuan *software* elemen hingga.
8. Parameter yang ditinjau adalah aksial, momen, dan persentase tulangan perlu, dan pengecekan kapasitas kekuatan pada kolom tinjauan
9. Hasil respons akan dibandingkan dengan diagram interaksi kolom menggunakan *software PCA Column*.
10. Dimensi struktur yang digunakan yaitu:

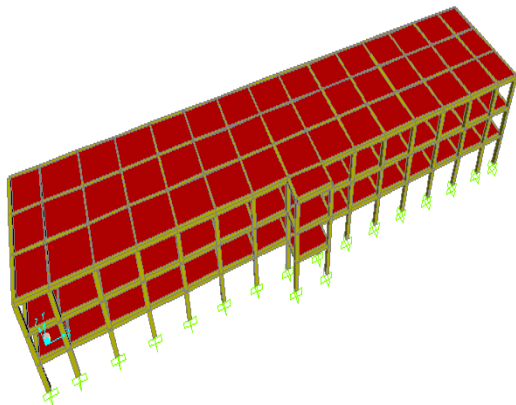
- a. Dimensi elemen dan bentuk struktur seperti pada gambar berikut ini :



Gambar 1. Denah Lantai Gedung



Gambar 2. Tampak Samping Gedung



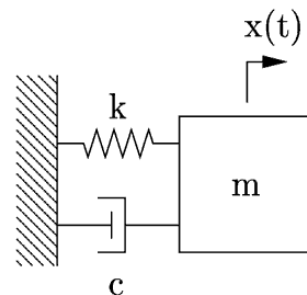
Gambar 3. Tampak Tiga Dimensi Gedung

- b. Kuat tekan beton, $f'_c = 29.05 \text{ MPa}$.
- c. Mutu tulangan utama, $f_y = 410 \text{ MPa}$.
- d. Mutu sengkang, $f_{ys} = 240 \text{ MPa}$.
- e. Diameter kolom silinder = 0.45 m
- f. Dimensi kolom persegi = 0.4 m x 0.4 m
- g. Diameter tulangan utama = 16 mm.
- h. Jumlah lantai = 3 lantai dengan ketinggian total gedung adalah 9.8 m.

B. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem Satu Derajat Kebebasan

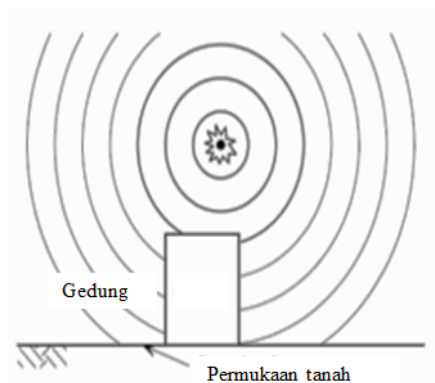
Sistem satu derajat kebebasan (*SDOF System*) adalah satu kesatuan sistem yang terdiri dari massa, elastisitas, dan redaman. Dalam idealisasinya, setiap bagian ini dapat dipisahkan menjadi tiga komponen, yaitu komponen massa, komponen kekakuan, dan komponen redaman. Secara umum idealisasi dari sistem satu derajat kebebasan dapat dijelaskan secara tepat pada Gambar 4. Elemen massa m menyatakan massa dan sifat inersia dari struktur. Elemen pegas k menyatakan gaya balik elastis dan kapasitas energy potensial dari struktur. Elemen redaman c menyatakan sifat geseran dan kehilangan energi dari struktur dan elemen gaya pengaruh $F(t)$ menyatakan gaya luar yang bekerja pada struktur yang dinyatakan dalam fungsi dari waktu. (Paz, 1996)



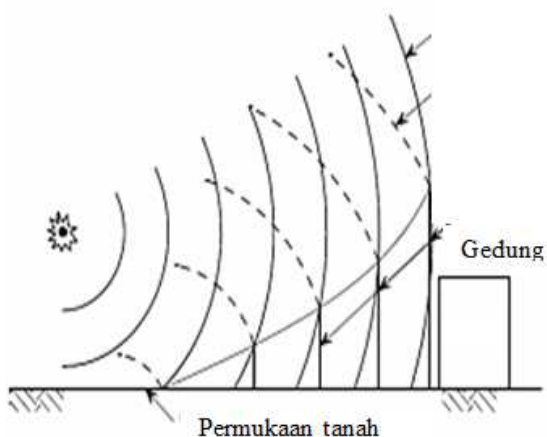
Gambar 4. Model Matematis untuk Sistem berderajat Kebebasan Satu (Paz, 1996)

Klasifikasi Ledakan

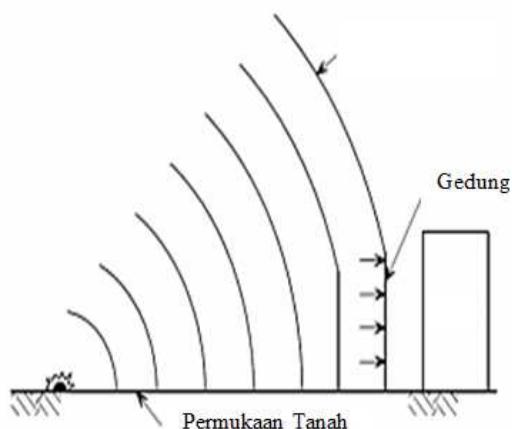
Ledakan secara umum terbagi tiga yaitu *Free Air Burst*, *Air Burst*, dan *Surface Burst*. Jika ledakan terjadi diatas udara dinamakan *Free Air Burst*, sedangkan apabila ledakan terjaid di udara dan gelombang mengalami pemantulan oleh permukaan tanah, maka dinamakan jenis *Air Burst*. Sedangkan *Surface Burst* adalah jenis ledakan yang terjadi dimana bom meledak diatas tanah. Ilustrasi dari ketiga klasifikasi ledakan ini dapat dilihat pada Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 1. *Free Air Burst Explosion* (Jayasooriya, 2010)



Gambar 2. *Air Burst with Ground Reflection* (Jayasooriya, 2010)



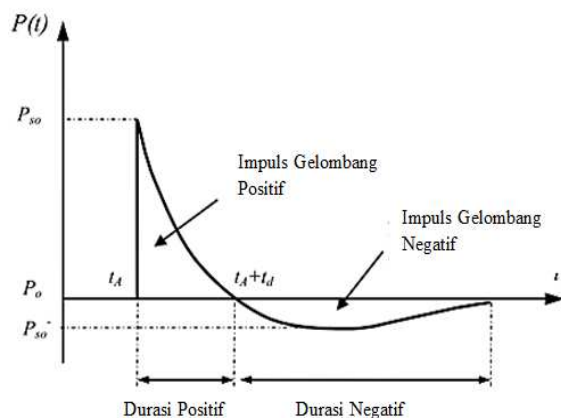
Gambar 3. *Surface Burst* (Jayasooriya, 2010)

Mekanisme Beban Ledakan

Ancaman kerusakan dari sebuah bom bergantung dari dua hal utama, yaitu ukuran bom tersebut atau massanya, W , dan jarak antara bom dan target (*Stand-off*

distance, R). Sebagai contoh, peristiwa pengeboman pada *basement* gedung *World Trade Centre* pada 1993 memiliki massa bom sebesar 816,5 kg TNT. Bom di Oklahoma tahun 1995 memiliki massa 1814 kg dengan jarak 4,5 m dari struktur (Shariat, Mallone, & Stephens Stidham, 1998). Serangan teroris dapat terjadi dalam rentang bom dengan massa ledakan yang kecil hingga bom pada truk seperti yang terjadi pada kota Oklahoma. Hal ini menjadi perhatian mengingat dampak kerusakan yang ditimbulkan sangat berbahaya bagi masyarakat.

Penelitian mengenai karakteristik gelombang ledakan memperlihatkan bahwa ada pengaruh utama dari sifat fisik sumber ledakan. Gambar 8 memperlihatkan profil sederhana dari tekanan ledakan. Beban ledakan mulai bekerja pada saat t_a , diikuti tekanan yang meningkat hingga mencapai puncaknya (P_{so}). Selanjutnya terjadi penurunan tekanan hingga fase hisap yang ditandai dengan tekanan bernilai negative pada akhir durasi positif. Berdasarkan grafik beban ledakan, fase negatif memiliki durasi yang lebih lama dan intensitas yang lebih rendah daripada fase positif. Semakin meningkatnya jarak sumber ledakan dari target, durasi dari fase positif akan meningkat akibat dari amplitude yang lebih kecil, sehingga gelombang ledakan yang ditimbulkan lebih lama. (Hussein, 2010)



Gambar 8. *Beban Ledakan* (Hussein, 2010)

Karakteristik grafik beban ledakan meliputi beberapa parameter yaitu :

1. Waktu yang dibutuhkan gelombang untuk mencapai struktur setelah ledakan terjadi, t_A ,
2. Tekanan atmosfer, P_o , tekanan udara normal pada atmosfer, bernilai 1 atm atau 100 kPa,
3. Gelombang puncak positif maksimum, P_{so} , Gelombang puncak maksimum yang terjadi selama ledakan terjadi,
4. Durasi fase positif, t_o , waktu yang dibutuhkan gelombang positif terjadi hingga mengalami penurunan menjadi tekanan atmosfer,
5. Positif impuls, I_o , impuls yang terjadi akibat gelombang positif,
6. Gelombang puncak negative maksimum, P_{so}^- , gelombang maksimum yang terjadi pada saat fase negatif atau dibawah tekanan atmosfer,
7. Durasi fase negative, t_d^- , waktu yang dibutuhkan gelombang negatif terjadi hingga mencapai tekanan atmosfer,
8. Negatif impuls, impuls yang terjadi akibat gelombang negatif.

Prediksi Tekanan Gelombang

Parameter gelombang ledakan secara konvensional telah diteliti selama tahun 1950-1960an. Perhitungan gelombang puncak berdasarkan skala jarak $Z=R/W^{1/3}$ telah diperkenalkan oleh Brode (1955) :

$$P_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ bar } (P_{so} > 10 \text{ bar}) \quad (1)$$

Newmark dan Hansen (1961) memperkenalkan rumusan untuk menghitung tekanan maksimum, P_{so} dalam bars, untuk ledakan akibat bom di atas tanah sebagai berikut

$$P_{so} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{1/3} \quad (2)$$

Persamaan lain untuk menghitung tekanan puncak dalam satuan kPa diperkenalkan oleh Mills (1987), dimana W

adalah massa TNT dalam kilogram dan Z adalah skala jarak sumber ledakan.

$$P_{so} = \frac{1772}{Z^3} + \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (3)$$

Perambatan gelombang melalui atmosfer akan mengakibatkan udara bergerak pada kecepatan yang lebih rendah. Kecepatan partikel udara dan tekanan angin tergantung pada gelombang puncak beban ledakan. hal ini memperlihatkan hubungan kecepatan udara dengan tekanan dinamik, $q(t)$. Besar maksimum q diberikan pada Persamaan 2.6.

$$q_o = 5p_{so}^2 / 2(p_{so} + 7p_o) \quad (4)$$

Jika gelombang ledakan mengenai suatu benda atau material selama perambatannya, terjadi refleksi gelombang yang dilambangkan dengan P_r

$$P_r = 2P_{so} \left\{ \frac{7P_o + 4P_o}{7P_o + 4P_{so}} \right\} \quad (5)$$

Perhitungan gelombang ledakan disempurnakan kembali oleh Mays dan Smith (1995) dan standar TM5-1300. Perhitungan manual ini telah disederhanakan dalam aplikasi *ATBlat* dalam menghitung parameter beban ledakan. Beberapa besaran gelombang puncak berdasarkan variasi massa dan jarak diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tekanan puncak refleksi gelombang gelombang, P_r (MPa) (Ngo, Mendis, Gupta, & Ramsay, 2007)

| R \ W | 100 kg TNT | 500 kg TNT | 1000 kg TNT | 2000 kg TNT |
|-------|------------|------------|-------------|-------------|
| 1 m | 165.8 | 354.5 | 464.5 | 602.9 |
| 2.5 m | 34.2 | 89.4 | 130.8 | 188.4 |
| 5 m | 6.65 | 24.8 | 39.5 | 60.19 |
| 10 m | 0.85 | 4.25 | 8.15 | 14.7 |
| 15 m | 0.27 | 1.25 | 2.53 | 5.01 |
| 20 m | 0.14 | 0.54 | 1.06 | 2.13 |
| 25 m | 0.09 | 0.29 | 0.55 | 1.08 |
| 30 m | 0.06 | 0.19 | 0.33 | 0.63 |

Gelombang dinamik adalah gelombang yang terjadi akibat partikel gas di udara bergerak dalam kecepatan yang lambat pada saat gelombang puncak terjadi. Hal ini akan menyebabkan angin selama perambatan gelombang puncak. Pergerakan angin ini akan bergerak mengikuti gelombang ledakan dan akan mengenai struktur. Gelombang dinamik merupakan fungsi dari kerapatan udara dan kecepatan angin (Ngo et al., 2007). Adapun besaran gelombang dinamik yang terjadi dapat dihitung menggunakan Persamaan Newmark yaitu :

$$q_0 = \frac{2,5 P_{so}^2}{(7 P_0 + P_{so})} \quad (6)$$

Dimana :

q_0 = Gelombang Dinamik

P_{s0} = Gelombang Puncak

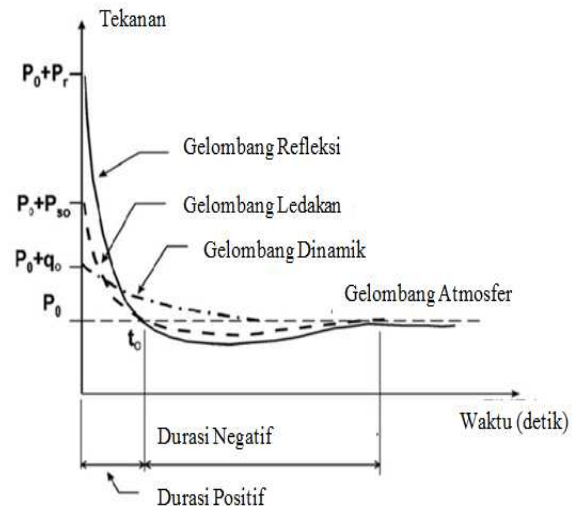
P_0 = Tekanan atmosfer (1 atm)

Gelombang Refleksi

Gelombang ledakan yang mengenai struktur akan mengalami pemantulan (gelombang refleksi). Gelombang puncak dan dinamik yang mengenai struktur akan dipantulkan kembali sesuai arah gelombang. Besarnya gelombang refleksi yang terjadi dipengaruhi dari arah datang gelombang dan geometri struktur.

Dalam perhitungan gelombang refleksi dipengaruhi oleh koefisien refleksi, yaitu Cr yang besarnya bervariasi sesuai arah gelombang dan gelombang puncak yang terjadi.

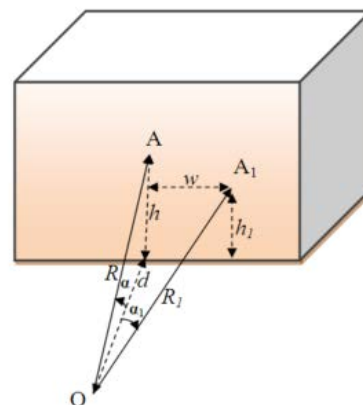
Selain gelombang refleksi, juga akan ditimbulkan gelombang dinamik yang akan mengenai struktur. Fenomena gelombang yang terjadi pada struktur dapat terjadi dalam tiga jenis, yaitu gelombang akibat beban, gelombang refleksi, dan gelombang dinamik. Grafik ketiga gelombang ini dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Beban Ledakan pada Struktur
(Remennikov & Carolan, 2006)

Perhitungan Distribusi Gelombang Ledakan

Gelombang ledakan yang diterima struktur akan mengalami difraksi dan refleksi, sehingga besaran gelombang yang diterima dari struktur tidak sama. Untuk menghitung distribusi gelombang ledakan, dilakukan perhitungan manual berdasarkan standar TM 5-1300 dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Seo (2010)



Gambar 10. Ilustrasi Perhitungan Gelombang Ledakan (Jayasooriya, 2010)

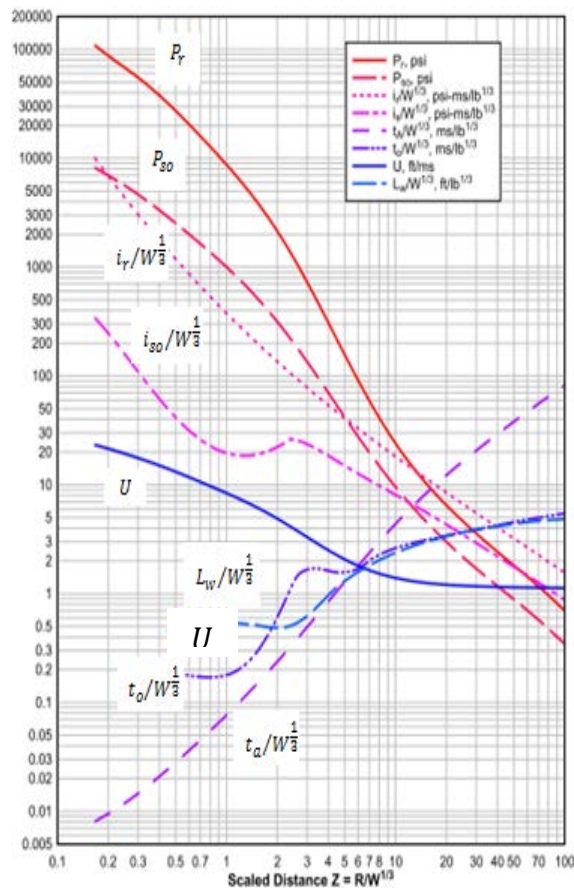
Berdasarkan Gambar 10 diketahui bahwa titik O adalah lokasi sumber ledakan atau bom yang akan ditinjau. Titik A adalah titik yang akan dihitung distribusi gelombang ledakannya. Diasumsikan data data untuk perhitungan sebagai berikut :

a. Gelombang di titik A

Diketahui data sebagai berikut:

- a. Jarak horizontal, d : 4 m = 13.12336 ft
- b. Jarak vertikal, v : 0 m
- c. Berat peledak, W : 500 kg = 1102.32 lb
- d. *Stand-off Distance*, R : 4 m = 13.12336 ft
- e. *Scaled Distance*, $Z : \frac{R}{W^{1/3}} = 1.2704$

Untuk penentuan parameter ledakan digunakan grafik berdasarkan standar UFC-3-340-02 yang mengatur tentang standar perhitungan untuk struktur yang mengalami beban ledakan sesuai pada Gambar 11.



Gambar 11. Parameter Gelombang untuk Durasi Positif untuk *Surfaced Explosion* (Singla et al, 2015)

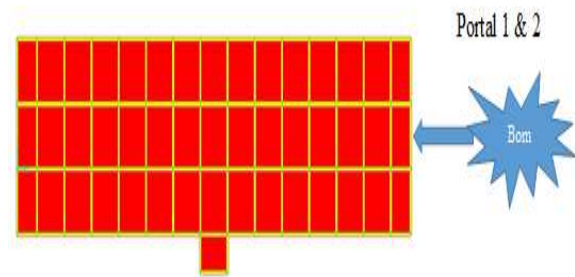
Dengan menentukan nilai skala jarak, Z pada Gambar 11 dapat ditentukan gelombang puncak, gelombang refleksi, durasi beban, dan durasi beban hingga merambat

kestruktur, yaitu: $Pr = 5645,12$ psi, $t_A = 0,95$ ms dan $t_d = 1.15$ ms.

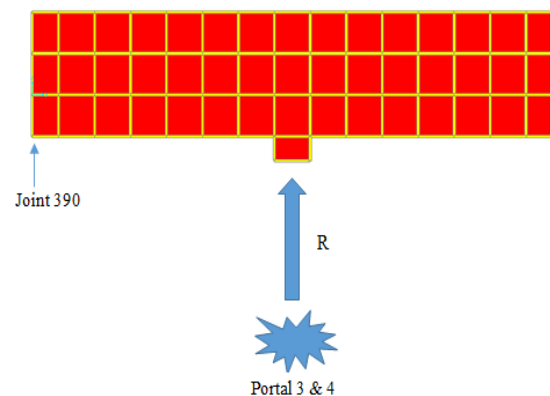
C. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Sketsa Lokasi Bom

Sketsa lokasi bom pada variasi model yang dianalisis dapat dilihat pada Gambar 12 dan 13. Bom yang digunakan adalah massa TNT 100 kg dan 500 kg dengan jarak 10 m dan 15 m.



Gambar 12. Sketsa Bom pada Struktur



Gambar 13. Sketsa Bom pada Struktur

Gelombang ledakan yang mengenai struktur akan mengalami perambatan gelombang. Berdasarkan standar UFC 3-340-02 beban ledakan dapat dimodelkan bekerja pada tiap titik joint yang bekerja. Berikut Tabel rekapitulasi perhitungan distribusi gelombang untuk kedua lokasi ledakan dapat dilihat pada Tabel 2 dan 3.

Tabel 2. Distribusi Gelombang Ledakan disamping struktur

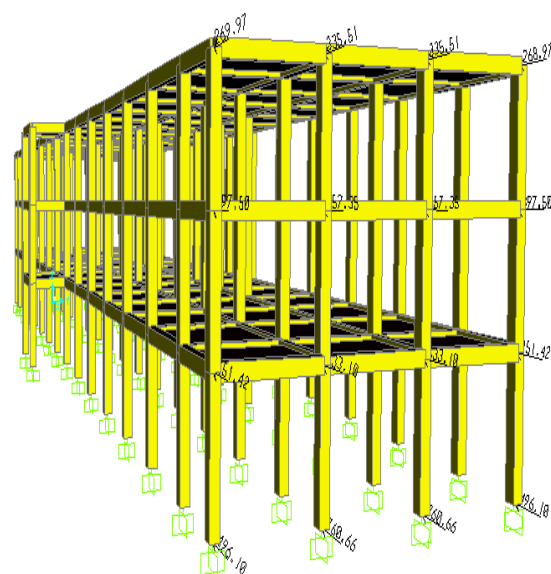
| Joint | d | v | w | α | R, ft | Z | Pr, kPa | td, ms | ta, ms |
|-------|----|------|------|----------|--------|-------|---------|--------|--------|
| 450 | 10 | 9.80 | 6.15 | 49.163 | 50.172 | 8.305 | 268.974 | 5.320 | 19.360 |
| 386 | 10 | 9.80 | 2.05 | 45.035 | 46.426 | 7.685 | 335.511 | 4.830 | 16.920 |
| 322 | 10 | 9.80 | 2.05 | 45.035 | 46.426 | 7.685 | 335.511 | 4.830 | 16.920 |
| 66 | 10 | 9.80 | 6.15 | 49.163 | 50.172 | 8.305 | 268.974 | 5.320 | 19.360 |
| 449 | 10 | 6.60 | 6.15 | 42.054 | 44.186 | 7.314 | 397.497 | 4.420 | 15.510 |
| 385 | 10 | 6.60 | 2.05 | 34.649 | 39.881 | 6.602 | 457.345 | 4.610 | 12.910 |
| 321 | 10 | 6.60 | 2.05 | 34.649 | 39.881 | 6.602 | 457.345 | 4.610 | 12.910 |
| 65 | 10 | 6.60 | 6.15 | 42.054 | 44.186 | 7.314 | 397.497 | 4.420 | 15.510 |
| 448 | 10 | 3.40 | 6.15 | 35.097 | 40.099 | 6.638 | 451.416 | 4.620 | 13.040 |
| 384 | 10 | 3.40 | 2.05 | 21.654 | 35.300 | 5.843 | 633.099 | 4.200 | 10.340 |
| 320 | 10 | 3.40 | 2.05 | 21.654 | 35.300 | 5.843 | 633.099 | 4.200 | 10.340 |
| 64 | 10 | 3.40 | 6.15 | 35.097 | 40.099 | 6.638 | 451.416 | 4.620 | 13.040 |
| 447 | 10 | 0.00 | 6.15 | 31.592 | 38.516 | 6.376 | 496.095 | 4.530 | 12.120 |
| 383 | 10 | 0.00 | 2.05 | 11.585 | 33.491 | 5.544 | 760.656 | 3.800 | 9.380 |
| 319 | 10 | 0.00 | 2.05 | 11.585 | 33.491 | 5.544 | 760.656 | 3.800 | 9.380 |
| 63 | 10 | 0.00 | 6.15 | 31.592 | 38.516 | 6.376 | 496.095 | 4.530 | 12.120 |

Tabel 3. Distribusi Gelombang Ledakan didepan struktur

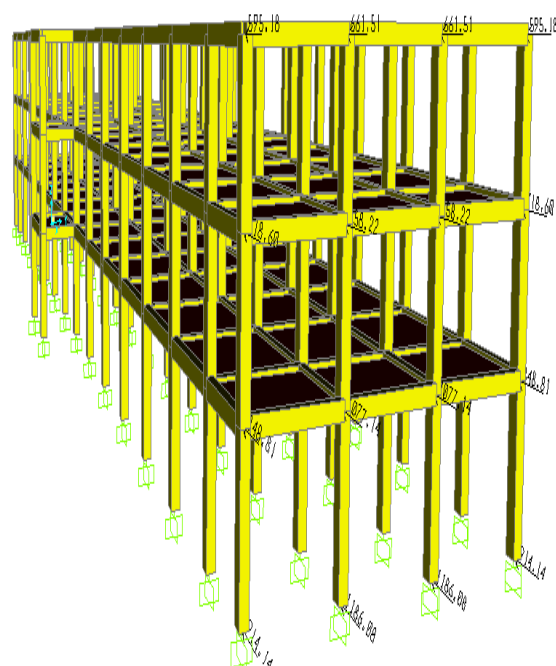
| Joint | d | h | w | α | R, ft | Z | Pr, kPa | td, ms | ta, ms |
|-------|----|-----|-------|----------|---------|--------|---------|--------|--------|
| 390 | 10 | 9.8 | 29.65 | 72.243 | 107.578 | 17.808 | 47.92 | 10.90 | 63.38 |
| 394 | 10 | 9.8 | 26.65 | 70.599 | 98.767 | 16.349 | 56.26 | 10.28 | 56.22 |
| 398 | 10 | 9.8 | 22.55 | 67.868 | 87.084 | 14.415 | 69.16 | 9.76 | 46.85 |
| 402 | 10 | 9.8 | 18.45 | 64.421 | 75.988 | 12.579 | 92.88 | 8.62 | 38.15 |
| 406 | 10 | 9.8 | 14.35 | 60.081 | 65.778 | 10.888 | 125.42 | 7.71 | 30.40 |
| 410 | 10 | 9.8 | 10.25 | 54.810 | 56.930 | 9.424 | 175.20 | 6.75 | 23.99 |
| 414 | 10 | 9.8 | 6.15 | 49.163 | 50.172 | 8.305 | 268.97 | 5.32 | 19.36 |
| 612 | 10 | 9.8 | 2.05 | 45.035 | 46.426 | 7.685 | 331.31 | 5.40 | 13.71 |
| 613 | 10 | 9.8 | 2.05 | 45.035 | 46.426 | 7.685 | 331.31 | 5.40 | 13.71 |
| 426 | 10 | 9.8 | 6.15 | 49.163 | 50.172 | 8.305 | 268.97 | 5.32 | 19.36 |
| 430 | 10 | 9.8 | 10.25 | 54.810 | 56.930 | 9.424 | 175.20 | 6.75 | 23.99 |
| 434 | 10 | 9.8 | 14.35 | 60.081 | 65.778 | 10.888 | 125.42 | 7.71 | 30.40 |
| 438 | 10 | 9.8 | 18.45 | 64.421 | 75.988 | 12.579 | 92.88 | 8.62 | 38.15 |
| 442 | 10 | 9.8 | 22.55 | 67.868 | 87.084 | 14.415 | 69.16 | 9.76 | 46.85 |
| 446 | 10 | 9.8 | 26.65 | 70.599 | 98.767 | 16.349 | 56.26 | 10.28 | 56.22 |
| 450 | 10 | 9.8 | 29.65 | 72.243 | 107.578 | 17.808 | 47.92 | 10.90 | 63.38 |
| 389 | 10 | 6.6 | 29.65 | 71.778 | 104.919 | 17.368 | 50.26 | 10.71 | 61.21 |
| 393 | 10 | 6.6 | 26.65 | 69.987 | 95.865 | 15.869 | 59.43 | 10.09 | 53.87 |
| 397 | 10 | 6.6 | 22.55 | 66.945 | 83.778 | 13.868 | 75.29 | 9.40 | 44.23 |
| 401 | 10 | 6.6 | 18.45 | 62.963 | 72.176 | 11.948 | 102.74 | 8.33 | 35.22 |

Selanjutnya gaya yang telah didapatkan diinput ke tiap joint menggunakan aplikasi *software* elemen

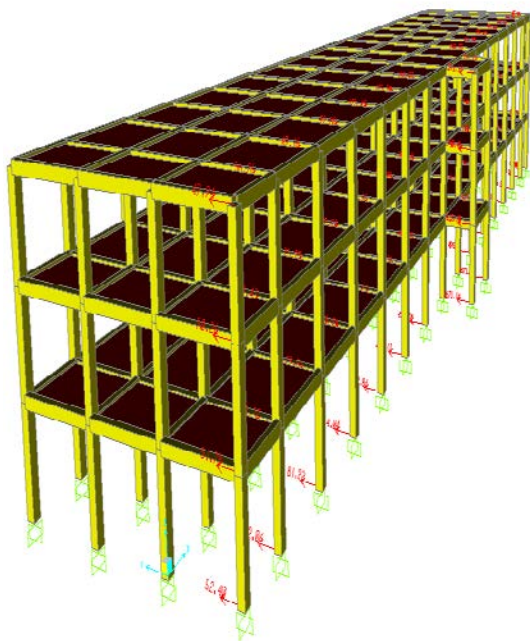
hingga. Beban dianggap bekerja secara statik dan dianalisis menggunakan metode elemen hingga. Adapun hasil input beban pada *joint* tiap struktur portal dapat dilihat pada Gambar 14 dan 15 untuk lokasi bom di samping struktur dan Gambar 16 dan 17 untuk lokasi bom di depan struktur.



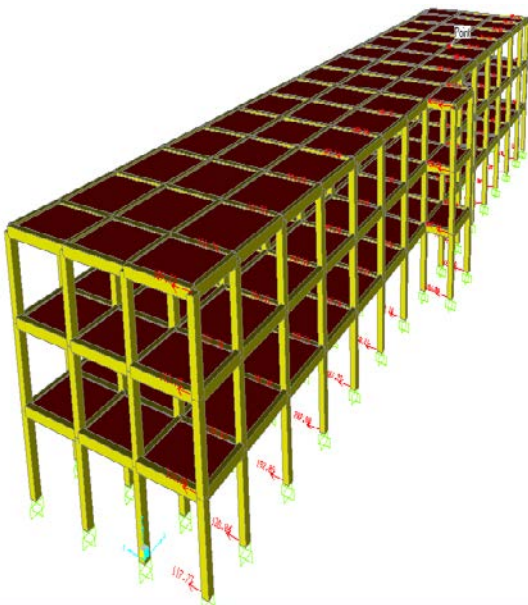
Gambar 14. Hasil *Input* Beban pada Joint untuk Model Portal 1



Gambar 15. Hasil *Input* Beban pada Joint untuk Model Portal 2



Gambar 16. Hasil *Input* Beban pada Joint untuk Model Portal 3

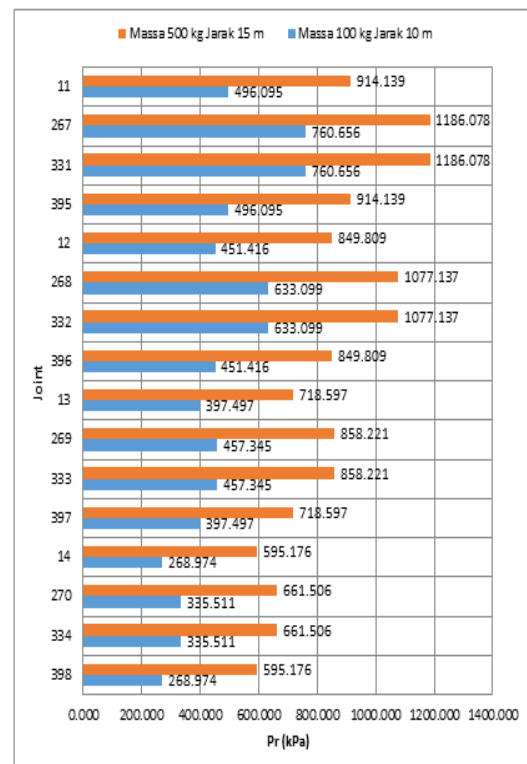


Gambar 17. Hasil *Input* Beban pada Joint untuk Model Portal 4

Hasil Analisis Distribusi Gelombang Ledakan

Perhitungan distribusi gelombang ledakan pada tiap model menggunakan

bantuan *software ATBlast* sesuai dengan Tabel 2 dan 3. Parameter gelombang yang didapatkan berupa gelombang refleksi, durasi gelombang, dan waktu tiba gelombang. Setelah dilakukan perhitungan distribusi gelombang ledakan, didapatkan data perbandingan gelombang refleksi yang terjadi dengan variasi dua massa bom yang digunakan sesuai pada Gambar 18 dan Gambar 19.

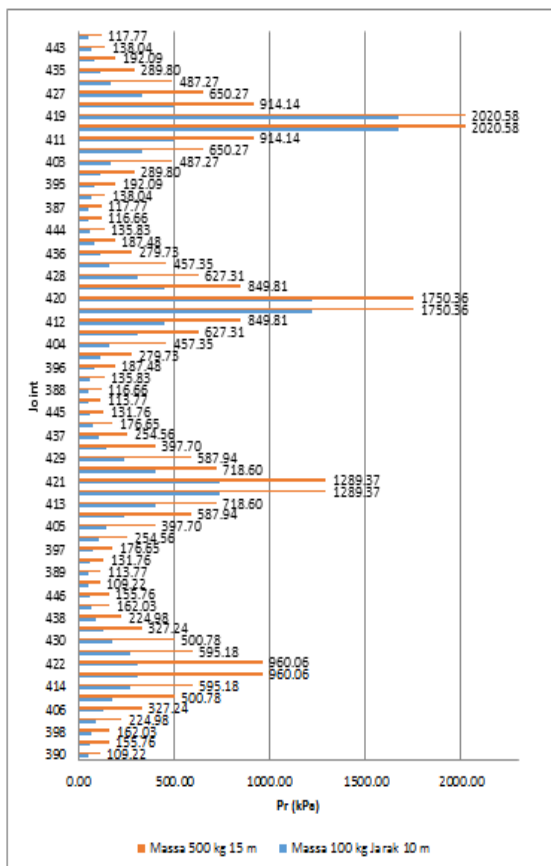


Gambar 18. Gelombang Refleksi Skenario Bom disamping Struktur

Berdasarkan Gambar 18 dilihat bahwa gelombang refleksi maksimum terjadi pada joint 267 dan 331 dengan massa bom 500 kg yaitu sebesar 1186.078 kPa untuk kasus bom diledakkan disamping struktur. Sedangkan gelombang refleksi maksimum untuk kasus bom diledakkan didepan struktur terjadi pada joint 419 dan 415 yaitu sebesar 2020.58 kPa. Gelombang refleksi terkecil terjadi pada joint 398 dan 270 yaitu sebesar 268.974 kPa dengan massa bom 100 kg. Kemudian joint lain mendapatkan gelombang refleksi yang

bervariasi sesuai dengan pengaruh jarak joint tersebut terhadap sumber ledakan.

Sedangkan pada Gambar 19 memperlihatkan bahwa bom dengan massa 500 kg memberikan gaya yang lebih besar dibandingkan massa 100 kg dari kedua variasi bom yang digunakan, walaupun jarak bom tersebut lebih jauh 5 m dari bom 100 kg. Hal ini menunjukkan massa peledak lebih berpengaruh dibandingkan jarak dalam besarnya gaya yang bekerja pada struktur. Gelombang ledakan terbesar diterima oleh kolom lantai dasar, baik pada massa bom 100 kg dan 500 kg TNT.



Gambar 19. Gelombang Refleksi Skenario Bom di depan Struktur

Hasil Analisis Struktur Portal

1. Portal 1

Berdasarkan hasil analisis, didapatkan gaya-gaya dalam yang bekerja pada titik kolom yang ditinjau sesuai Tabel 4 dan Tabel 5. Tabel 4 memperlihatkan

gaya-gaya dalam pada model penampang persegi, sedangkan Tabel 5 memperlihatkan gaya-gaya dalam pada penampang silinder.

Tabel 4. Gaya-Gaya Dalam pada Kolom Tinjauan Portal 1 Persegi

| Kolom | P (kN) | M2 (kNm) | M3 (kNm) | Status |
|-------|--------|----------|----------|--------|
| C1 | 463.22 | -12.61 | -154.15 | Aman |
| C2 | 404.90 | -11.03 | -146.19 | Aman |
| C3 | 674.11 | -18.36 | -152.25 | Aman |
| C4 | 181.67 | -6.275 | -160.30 | Aman |

Tabel 5. Gaya-Gaya Dalam pada Kolom Tinjauan Portal 1 Silinder

| Kolom | P (kN) | M2 (kNm) | M3 (kNm) | Status |
|-------|--------|----------|----------|--------|
| C1 | 462.34 | -13.28 | -153.31 | Aman |
| C2 | 404.96 | -11.64 | -145.26 | Aman |
| C3 | 674.46 | -4.88 | -151.20 | Aman |
| C4 | 179.83 | -6.15 | -158.39 | Aman |

Hasil analisis memperlihatkan bahwa kolom yang lebih dekat dengan sumber ledakan akan mengalami momen yang lebih besar yang diperlihatkan dari kolom C4. Momen yang terjadi berupa momen negatif yang menunjukkan bahwa timbul tarik yang lebih dominan pada kolom. Gaya aksial yang paling besar diterima oleh kolom C2 pada model penampang persegi yaitu sebesar 674.11 kN, sedangkan gaya aksial terbesar untuk penampang silinder adalah sebesar 674.46 kN.

Dari hasil pengecekan kapasitas struktur, Portal 1 menunjukkan kondisi aman terhadap beban ledakan yang diaplikasikan, baik model penampang kolom silinder maupun kolom persegi. Setiap elemen struktur balok dan kolom masih mampu menahan beban dan belum mencapai kegagalan struktur.

2. Portal 2

Berdasarkan hasil analisis pada kedua model struktur penampang kolom persegi dan silinder, didapatkan gaya-gaya dalam yang bekerja pada titik kolom yang ditinjau sesuai Tabel 6 dan 7.

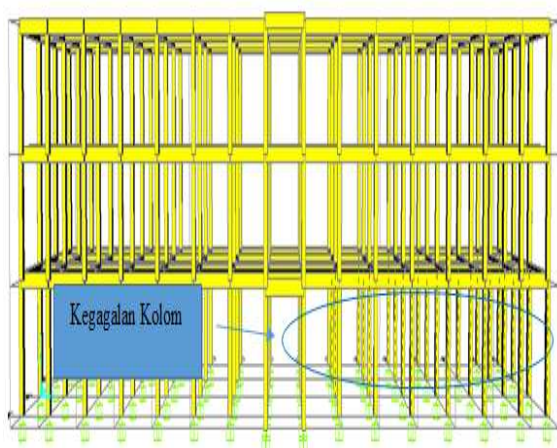
Tabel 6. Gaya Gaya Dalam pada Kolom Tinjauan Portal 2 Persegi

| Kolom | P (kN) | M2 (kNm) | M3 (kNm) | Status |
|-------|--------|----------|----------|-------------|
| C1 | 428.08 | -11.67 | -232.94 | Aman |
| C2 | 685.73 | -18.68 | -256.89 | Aman |
| C3 | 474.36 | -12.92 | -176.605 | Aman |
| C4 | 47.41 | -3.06 | -338.906 | Over stress |

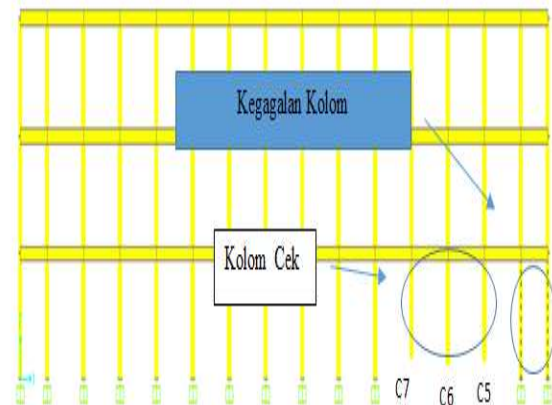
Tabel 7. Gaya Gaya Dalam pada Kolom Tinjauan Portal 2 Silinder

| Kolom | P (kN) | M2 (kNm) | M3 (kNm) | Status |
|-------|--------|----------|----------|-------------|
| C1 | 426.88 | -12.67 | -232.75 | Aman |
| C2 | 475.60 | -13.67 | -177.25 | Aman |
| C3 | 685.85 | -19.71 | -255.71 | Aman |
| C4 | 45.38 | -2.995 | -333.82 | Over Stress |

Tabel 6 memperlihatkan pada kolom C4 pada model dengan penampang kolom persegi, terjadi kegagalan struktur. Hal ini disebabkan momen negatif yang besar pada sumbu X sebesar 338.906 kNm. Sedangkan untuk kolom yang lain, masih mencukupi dalam menerima beban aksial dan momen yang terjadi. Adapun untuk model penampang silinder sesuai table 7 juga menunjukkan hasil yang sama dengan kolom C4 yang mengalami kegagalan. Adapun hasil pengecekan kapasitas struktur dapat dilihat pada Gambar 20 dan 21.



Gambar 20. Hasil Pengecekan Kapasitas Struktur Portal 2



Gambar 21. Hasil Pengecekan Kapasitas Struktur Portal 2

Gambar 21 memperlihatkan hanya terjadi keruntuhan pada dua buah kolom tepi pada bagian depan struktur, sedangkan untuk kolom persegi sesuai pada Gambar 20 dapat dilihat ada enam buah kolom yang mengalami kegagalan struktur. Hal ini membuktikan bahwa untuk penampang kolom silinder memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan kolom persegi dalam menahan beban ledakan. Sebagai pembanding, akan dilihat dari persentase tulangan perlu pada tiga kolom disamping kolom C4.

Tabel 8. Perbandingan Tulangan Perlu Struktur Portal 2

| Kolom | Kolom Silinder | Kolom Persegi |
|-------|----------------|---------------|
| C5 | 5.62% | Over stress |
| C6 | 5.11% | Over stress |
| C7 | 4.59% | Over stress |

Tabel 8 memperlihatkan bahwa luas tulangan pada kolom silinder untuk ketiga kolom kurang dari syarat persentase tulangan perlu berdasarkan ACI 318-05 yaitu 6%. Apabila persentase tulangan perlu melebihi 6%, maka dianggap tulangan mengalami kegagalan. Pada kolom silinder, persentase tulangan perlu maksimum adalah pada kolom C5 sebesar 5.62% dan dianggap masih mencukupi dalam menahan beban. Sedangkan pada kolom persegi, ketiga kolom telah mengalami keruntuhan.

3. Portal 3

Berdasarkan hasil analisis, didapatkan gaya gaya dalam yang bekerja pada titik kolom yang ditinjau sesuai Tabel 9 dan 10.

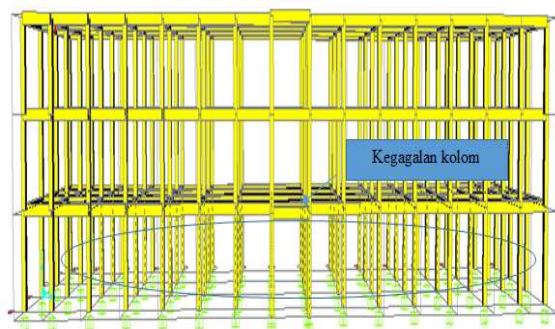
Tabel 9. Gaya Gaya Dalam pada Kolom Tinjauan Portal 3 Persegi

| Kolom | P (kN) | M2 (kNm) | M3 (kNm) | Status |
|-------|---------|----------|----------|-------------|
| C1 | 337.14 | 242.42 | 16.65 | Aman |
| C2 | -123.79 | 344.09 | -8.77 | Over stress |
| C3 | 938.28 | 368.28 | -27.49 | Over stress |
| C4 | 129.98 | 239.84 | -14.08 | Aman |

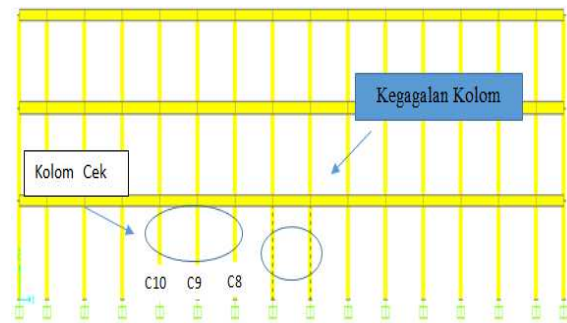
Tabel 10. Gaya Gaya Dalam pada Kolom Tinjauan Portal 1 Silinder

| Kolom | P (kN) | M2 (kNm) | M3 (kNm) | Status |
|-------|----------|----------|----------|-------------|
| C1 | 335.36 | 246.90 | 16.14 | Aman |
| C2 | -125.706 | 340.00 | -8.65 | Over Stress |
| C3 | 939.67 | 364.25 | -29.73 | Over Stress |
| C4 | 127.59 | 238.59 | -13.60 | Aman |

Tabel 9 dan 10 memperlihatkan kegagalan struktur pada kolom C2 dan C3. Hal ini disebabkan momen positif yang bekerja pada sumbu lemah sangat besar sehingga terjadi keruntuhan. Sedangkan untuk kolom C1 dan C4 belum terjadi kegagalan struktur pada kedua penampang dan kolom dianggap mampu menahan beban. Pada portal 3 momen yang dominan terjadi searah pada sumbu lemah, karena arah gelombang ledakan yang bekerja searah dengan sumbu lemah struktur. Adapun hasil pengecekan kapasitas struktur dapat dilihat pada Gambar 22 dan 23.



Gambar 22. Hasil Pengecekan Kapasitas Struktur Portal 3



Gambar 23. Hasil Pengecekan Kapasitas Struktur Portal 3

Gambar 23 memperlihatkan hanya terjadi keruntuhan pada dua buah kolom tengah pada bagian depan struktur, sedangkan untuk kolom persegi sesuai pada Gambar 22 terdapat delapan buah kolom yang mengalami kegagalan struktur. Berdasarkan hal ini dibuktikan bahwa kolom silinder memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan penampang kolom persegi dalam menahan beban ledakan di depan struktur. Sebagai pembanding, akan dilihat persentase tulangan yang diperlukan pada tiga kolom disamping kolom tengah sesuai Gambar 4.13

Tabel 11. Persentase Luas Tulangan Perlu pada Kolom

| Kolom | Kolom Silinder | Kolom Persegi |
|-------|----------------|---------------|
| C8 | 5.40% | Over stress |
| C9 | 5.14% | Over stress |
| C10 | 4.79% | Over stress |

Tabel 4.10 memperlihatkan bahwa luas tulangan pada kolom silinder untuk ketiga kolom kurang dari syarat persentase tulangan perlu berdasarkan ACI 318-05 yaitu 6%. Pada kolom silinder, persentase tulangan perlu maksimum adalah pada kolom C8 sebesar 5.40% dan dianggap masih mencukupi dalam menahan beban. Sedangkan pada kolom persegi, ketiga kolom telah mengalami keruntuhan.

4. Portal 4

Berdasarkan hasil dalam analisis beban, didapatkan gaya gaya dalam yang

bekerja pada titik kolom yang ditinjau sesuai Tabel 12 dan 13.

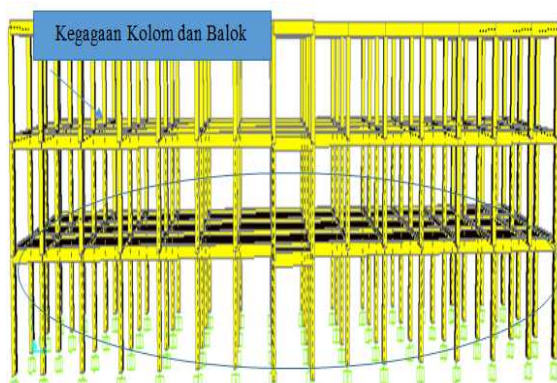
Tabel 12. Gaya Gaya Dalam pada Kolom Tinjauan Portal 4 Persegi

| Kolom | P (kN) | M2 (kNm) | M3 (kNm) | Status |
|-------|----------|----------|----------|-------------|
| C1 | 84.127 | 584.15 | 40.43 | Over stress |
| C2 | -722.775 | 803.64 | -19.68 | Over stress |
| C3 | 1289.96 | 857.37 | -35.14 | Over stress |
| C4 | 131.44 | 564.06 | -36.27 | Over stress |

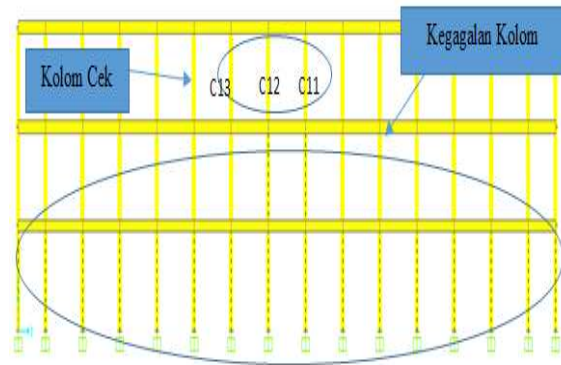
Tabel 13. Gaya Gaya Dalam pada Kolom Tinjauan Portal 4 Silinder

| Kolom | P (kN) | M2 (kNm) | M3 (kNm) | Status |
|-------|---------|----------|----------|-------------|
| C1 | -135.60 | 560.96 | 35.18 | Over Stress |
| C2 | -725.75 | 793.88 | -20.86 | Over Stress |
| C3 | 1292.58 | 847.87 | -37.15 | Over Stress |
| C4 | -80.312 | 580.45 | -39.25 | Over Stress |

Tabel 12 dan 13 memperlihatkan bahwa terjadi kegagalan pada seluruh kolom yang ditinjau. Kolom tengah mendapatkan gaya dalam yang lebih besar dibanding kolom tepi. Contohnya pada kolom C3 mendapatkan kombinasi aksial dan momen yang paling besar dibandingkan kolom lainnya, yaitu 1289.96 kN dan 857.37 kNm. Adapun hasil pengecekan kapasitas dapat dilihat pada Gambar 24 dan 25.



Gambar 24. Hasil Pengecekan Kapasitas Struktur Portal 2



Gambar 25. Hasil Pengecekan Kapasitas Struktur Portal 2

Gambar 24 dan 25 memperlihatkan kolom lantai 1 dan 2 mengalami kegagalan, hampir sama dengan kolom persegi. Jadi dapat disimpulkan untuk beban ledakan 500 kg dengan jarak 15 m. tidak terdapat perbedaan kekuatan yang besar dengan kolom persegi, karena dianggap kedua struktur mengalami keruntuhan.

Untuk perbandingan persentase luas tulangan perlu yang digunakan, dapat dilihat pada Tabel 4.12

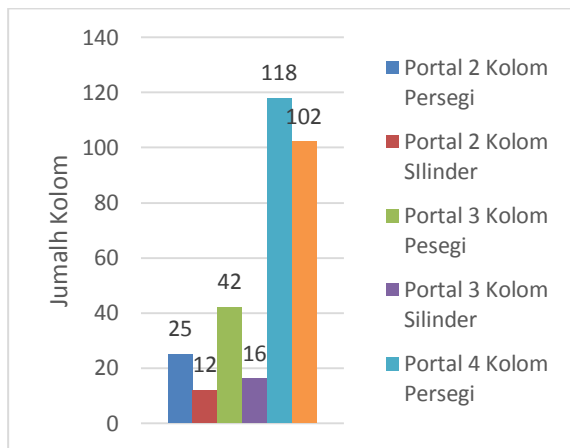
Tabel 14. Persentase Luas Tulangan Perlu pada Kolom

| Kolom | Kolom Silinder | Kolom Persegi |
|-------|----------------|---------------|
| C11 | 2.84% | 3.30% |
| C12 | 1.00% | 1.00% |
| C13 | 1.00% | 1.00% |

Tabel 14 memperlihatkan bahwa luas tulangan perlu pada kolom silinder untuk kolom C8 lebih kecil dibandingkan kolom persegi. Sedangkan untuk kolom C9 dan C10 persentase tulangan perlu untuk kedua tipe kolom sama. Hal ini menunjukkan bahwa kolom silinder tetap memberikan kekuatan yang lebih dibandingkan kolom persegi, tetapi untuk kasus portal 4 ini tidak terlalu signifikan perbedaan kekuatan yang didapatkan, karena kedua struktur telah mengalami kegagalan pada kolom lantai 1 dan 2.

Perbandingan Kapasitas Kolom Persegi dan Kolom Silinder

Berdasarkan hasil analisis tiap portal dengan tipe penampang persegi dan silinder, dapat dirangkum jumlah kolom yang mengalami keruntuhan berdasarkan Gambar 26.



Gambar 26. Hasil Pengecekan Kapasitas Struktur Portal 2

Berdasarkan Gambar 26 diketahui bahwa kolom silinder lebih sedikit mengalami kegagalan dibandingkan kolom persegi. Portal 2 mengalami jumlah keruntuhan kolom yang paling sedikit dibandingkan yang lain, yaitu 12 kolom. Dari hasil analisis portal 2 dan 3, dilihat ada perbedaan yang cukup signifikan antara kolom persegi dan kolom silinder. Hal ini disebabkan struktur masih cukup mampu menahan beban ledakan yang diberikan walaupun sudah ada beberapa kolom yang runtuh. Sedangkan untuk portal 4, keruntuhan telah terjadi di seluruh kolom lantai 1 dan 2, sehingga jumlah kolom yang mengalami keruntuhan dari dua jenis penampang persegi dan silinder tidak jauh berbeda.

Apabila dibandingkan dengan total kolom pada struktur, dapat dilihat berapa persentase beban ledakan yang merusak kolom. Persentase didapat dengan membagi jumlah kolom yang runtuh dibagi dengan total kolom. Total kolom pada struktur

adalah 198 buah kolom dari lantai 1 hingga lantai 3. Hasil perbandingan persentase keruntuhan kolom untuk tiap jenis portal dapat dilihat pada Tabel 15.

Tabel 15. Perbandingan Jumlah Keruntuhan Kolom Silinder dan Persegi

| Jenis Portal | Jumlah Keruntuhan Kolom | Persentase Kerusakan |
|---------------------|-------------------------|----------------------|
| Portal 2 - Persegi | 25 | 12.62 % |
| Portal 2 - Silinder | 12 | 6.06% |
| Portal 3 - Persegi | 42 | 21.21% |
| Portal 3 - Silinder | 16 | 8.08% |
| Portal 4 - Persegi | 118 | 59.60% |
| Portal 4 - Silinder | 102 | 51.51% |

Tabel 15 memperlihatkan untuk portal 2 tipe kolom silinder dengan beban ledakan 100 kg jarak 10 m, terjadi keruntuhan kolom sebesar 6.06%. Portal 4 dengan tiap kolom persegi menghasilkan persentase kerusakan terbesar yaitu 59.60%. Lokasi kolom yang mengalami keruntuhan mengikuti arah datangnya gelombang ledakan. Untuk portal 2, kolom tepi kanan yang dominan mengalami keruntuhan, karena bom diledakkan pada kanan struktur, sedangkan Portal 3 dan 4 terpusat pada kolom tengah, karena bom diledakkan didepan struktur. Hasil ini memperlihatkan bahwa lokasi ledakan sangat mempengaruhi lokasi elemen struktur yang mengalami keruntuhan.

D. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan analisis tugas akhir ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Gaya aksial terbesar yang diperoleh pada analisis struktur akibat beban ledakan adalah 1289.96 kN pada Portal 4 dengan tipe kolom persegi dan aksial terkecil adalah 45.38 kN pada Portal 2 dengan tipe kolom silinder.
2. Gaya Momen terbesar yang diperoleh untuk arah sumbu kuat (M3) adalah - 338.90 kNm pada Portal 2 dengan tipe kolom persegi dan momen terkecil

adalah -8,65 kNm pada Portal 3 dengan tipe kolom silinder.

3. Persentase tulangan perlu terbesar yang digunakan adalah 5.62% dan persentase terkecil adalah 1.00%
4. Persentase kolom yang mengalami keruntuhan terkecil adalah 6.02% pada Portal 2 dengan tipe kolom Silinder
5. Kolom silinder membutuhkan persentase tulangan perlu yang lebih sedikit dibandingkan kolom persegi yaitu sebesar 1.25%
6. Struktur mampu menahan beban ledakan dengan massa peledak 100 kg dengan jarak 10 m di samping struktur untuk tipe penampang kolom persegi dan silinder
7. Kolom silinder lebih kuat dan efektif dari kolom persegi dalam menahan beban ledakan dengan mutu beton, mutu tulangan dan luas penampang yang sama.

E. SARAN

Saran yang dapat penulis berikan dari hasil penelitian ini yaitu:

1. Untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, dapat digunakan variasi massa dan jarak peledak yang lebih beragam serta parameter tinjauan yang lain seperti geser, torsi, dan defleksi.
2. Penelitian selanjutnya dapat meneliti untuk tipe bom *Internal* (bom di dalam gedung) dengan tipe struktur dan material yang berbeda seperti gedung portal baja ataupun jembatan.

F. DAFTAR PUSTAKA

- Hussein, A. T. (2010). Non-Linear Analysis of SDOF System under Blast Load. *European Journal of Scientific Research*, 45(3), 430–437.
- Jayasooriya, J. H. A. R. (2010). *Vulnerability and Damage Analysis of Reinforced Concrete Framed Buildings Subjected to near Field Blast Events*.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., & Ramsay, J. (2007). Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview. Paz, M. (1996). *Dinamika Struktur Teori dan Perhitungan*. (I. M. Hariandja, Ed.) (Edisi Kedu). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Remennikov, A. M., & Carolan, D. (2006). Blast Effects and Vulnerability of Building Structures from Terrorist Attack. *Australian Journal of Structural Engineering*, (April).
- Shariat, S., Mallone, S., & Stephens Stidham, S. (1998). *Summary of Reportable Injuries in Oklahoma* (Vol. 1299). United States.
- Singla, S., Singla, P., & Singla, A. (2015). Computation of Blast Loading for a Multi Storeyed Framed Building. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 759–766.